

Quantentransport und Quantenkohärenz in mesoskopischen Systemen

Faszinierende Quanteneffekte von Spin und Ladung

Die fortlaufende Miniaturisierung von elektronischen und magnetischen Systemen führt zu Längenskalen, auf denen die uns aus dem Alltag bekannte makroskopische Physik nicht mehr gültig ist. Es treten *Quanteneffekte* auf, die mit dem Wellencharakter der Elektronen zusammenhängen. In makroskopischen Systemen wird die Wellennatur oft nicht beobachtet, da inelastische Prozesse die Kohärenz der Wellenfunktion zerstören, d.h. die Phase ist nicht wohldefiniert über die Probe. In *mesoskopischen* Systemen, d.h. im Zwischenbereich der mikroskopischen und makroskopischen Welt, befinden sich zwar immer noch viele Teilchen, aber die Kohärenzlänge L_ϕ der Wellenfunktion wird von der gleichen Größenordnung wie die Systemlänge L . Dies bedeutet, dass Teilchen kohärent durch das System propagieren, d.h. die Phase der ein- und auslaufenden Teilchen ist korreliert. Es treten Interferenzeffekte auf, genauso wie Lichtwellen an einem Doppelspalt gebeugt werden. Ein elektronisches Analogon ist in Bild 1

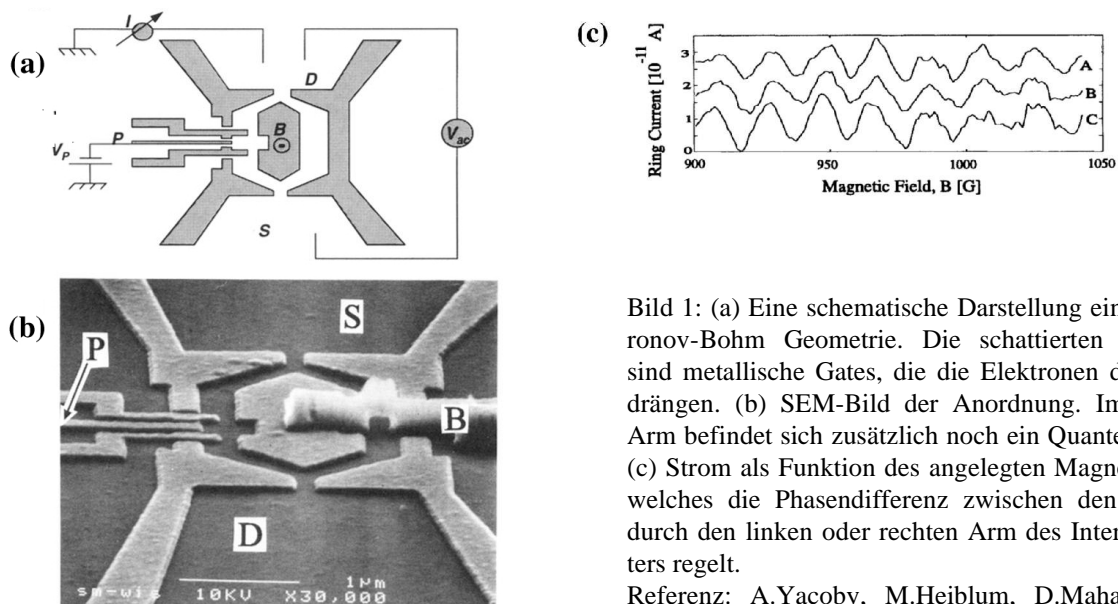


Bild 1: (a) Eine schematische Darstellung einer Aharonov-Bohm Geometrie. Die schattierten Flächen sind metallische Gates, die die Elektronen dort verdrängen. (b) SEM-Bild der Anordnung. Im linken Arm befindet sich zusätzlich noch ein Quantenpunkt. (c) Strom als Funktion des angelegten Magnetfeldes, welches die Phasendifferenz zwischen den Wegen durch den linken oder rechten Arm des Interferometers regelt.

Referenz: A.Yacoby, M.Heiblum, D.Mahalu, and H.Shtrikman, Phys.Rev.Lett. 74, 4047 (1995)

dargestellt, eine Aharonov-Bohm Geometrie, bei der die Elektronen auf zwei verschiedenen Wegen vom Emitter zum Kollektor gelangen können. Der Phasenunterschied der beiden Wege wird durch den Fluss eines Magnetfeldes gesteuert. Die resultierende konstruktive oder destruktive Interferenz führt zu Aharonov-Bohm Oszillationen des linearen Leitwertes, s. Bild 1c. Auch der

Transport durch Halbleiter-Quantenpunkte zeigt die Quantenkohärenz. Eine mögliche Realisierung in vertikalen Halbleiterheterostrukturen ist in Bild 2a dargestellt. Quantenpunkte stellen nulldimensionale Quantensysteme dar, die über Tunnelbarrieren an elektronische Reservoirs angekoppelt sind, s. Bild 2b. Ein resonanter Leitwert wird beobachtet, wenn die Fermikante der Reservoirs mit einer Einteilchen-Anregungsenergie des Quantenpunktes übereinstimmt. Anschaulich bedeutet dies, dass eine einfallende Welle mit Fermienergie beim einfachen

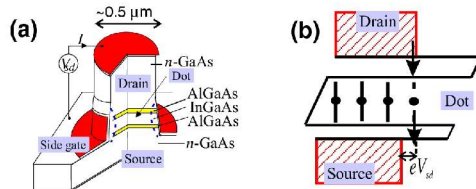


Bild 2: (a) Vertikaler Quantenpunkt in einer Halbleiterheterostruktur. Der Quantenpunkt befindet sich zwischen zwei AlGaAs Tunnelbarrieren. (b) Schematisches Energie-Diagramm. Die Elektronen tunneln resonant durch die diskreten Energieniveaus des Quantenpunktes.

Referenz: L.P.Kouwenhoven, D.G.Austing, and S. Tarucha, Rep. Prog. Phys. 64, 701 (2001).

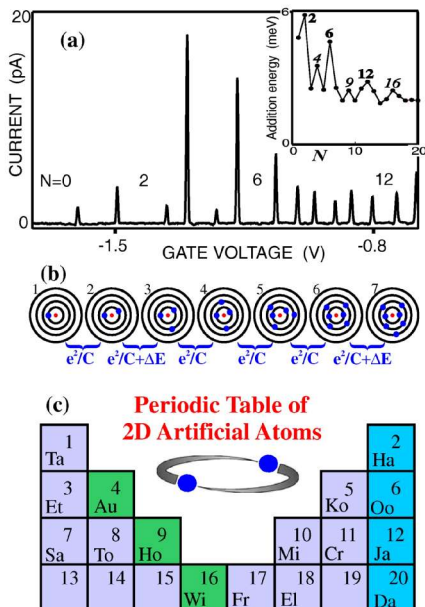


Bild 3: (a) Strom durch einen vertikalen Quantenpunkt (s. Bild 2) als Funktion der Gatterspannung, die die Position der Energieniveaus verändert. (b) Schalenmodell der elektronischen Bahnen. (c) Periodensystem für Elektronen in einem parabolischen zweidimensionalen Potential.

Referenz: wie bei Bild 2.

Hin- und Her-Reflektieren zwischen den Tunnelbarrieren eine Phase aufliert, die ein Vielfaches von 2π ist. Genau dann erhält man konstruktive Interferenz und eine Resonanz. Die Resonanzbedingung wird über Gatterspannungen reguliert, die zylindrisch um den vertikalen Quantenpunkt angelegt sind. Als Folge ergeben sich Resonanzen bei bestimmten Gatterspannungen, aus deren Positionen Rückschlüsse über die Energie der Orbitale gewonnen werden kann, s. Bild 3. Wie in der Atomphysik kann man darüber Schalenstrukturen und die Hund'sche Regel in Quantenpunkten nachweisen.

Quantenkohärenz in mesoskopischen Systemen könnte zur Entwicklung neuer Bauelemente mit besonderen Funktionalitäten führen. Zwei Beispiele sind in Bild 4+5 dargestellt. Bild 4 zeigt den Datta-Das-Transistor, bei dem der Elektronenspin kohärent zwischen zwei ferromagnetischen Elektroden transportiert wird. Die Spindynamik wird über den Rashba-Effekt kontrolliert, der von elektrischen Feldern einer Gatterelektrode verursacht wird. Je nach Spinrichtung, die vor dem Tunneln in den Kollektor vorliegt, ergibt sich ein hoher oder niedriger Leitwert. Bild 5 zeigt den Loss-DiVincenzo Quantencomputer. Der Spinzustand von einzelnen Elektronen in Quantenpunkten kann sich in einer kohärenten Superposition von zwei Spinrichtungen befinden. Dies bildet ein sogenanntes Q-Bit, welches sich fundamental von einem klassischen Bit unterscheidet, da beide Zustände *gleichzeitig* mit bestimmten Amplituden vorliegen können. Die Q-Bits können über äussere Magnetfelder und Modulation der Tunnelbarrieren zwischen den Quantenpunkten gesteuert werden. Interferenzeffekte in solchen Quantenstrukturen machen die Realisierung von Quantenalgorithmen möglich, die exponentiell schneller als klassische Algorithmen sind. In diesen beiden Beispielen wird die kohärente Dynamik von Spinfreiheitsgraden ausgenutzt, die für zukünftige Anwendungen am aussichtsreichsten erscheint, da viele inelastische Prozesse den Spin nicht beeinflussen, die orbitalen Freiheitsgrade hingegen schon.

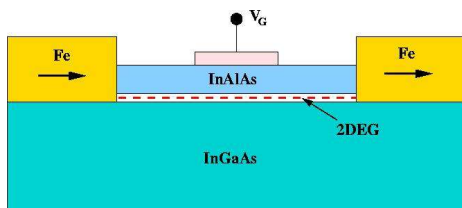


Bild 4: Der Datta-Das-Transistor. Mittels einer ferromagnetischen Zuleitung werden spinpolarisierte Elektronen injiziert, die ballistisch zu einer anderen ferromagnetischen Elektrode transportiert werden. Über die Spin-Bahn-Kopplung wird der Spin beim Durchgang durch die Probe kohärent durch die elektrischen Felder der Gatterelektrode beeinflusst. Dadurch wird das Tunneln in den Kollektor gezielt gesteuert.

Referenz: S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990).

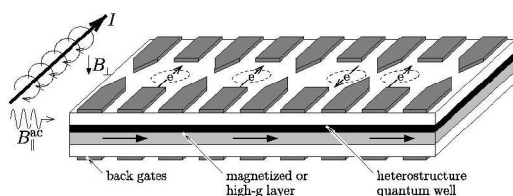


Bild 5: Der Loss-DiVincenzo Quantencomputer. Die Spins von einzelnen Elektronen in Quantenpunkten bilden Q-Bits, die über äussere Magnetfelder und variable Tunnelbarrieren kohärent und kontrolliert gesteuert werden können.

Referenz: D. Loss and D.P. DiVincenzo, Phys. Rev. A 57, 120 (1998); G. Burkhard, H.A. Engel, and D. Loss, Fortschr. der Physik 48, 965 (2000).

Die technologische Realisierung von Quantenbauelementen ist ein langfristiges Ziel, die Grundlagenforschung steht momentan noch im Vordergrund. Am Institut für Theoretische Physik A (TPA) werden Quantenkohärenz und Quantentransport von Spin und Ladung in mesoskopischen Systemen theore-

tisch untersucht. Neben resonantem Tunneln, Coulomb-Blockade, und Einflüssen von inelastischen Prozessen (dissipative Quantenmechanik) werden insbesondere interessante kollektive Vielteilcheneffekte studiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Festkörpern können letztere in mesoskopischen Systemen experimentell gezielt manipuliert und studiert werden. Im folgenden werden einige der Projekte an verschiedenen mesoskopischen und molekularen Systemen dargestellt.

Quantenpunkte: Ein fundamentales Beispiel für ein mesoskopisches Quantensystem, wo interessante Vielteilcheneffekte in Kombination mit Quantenkohärenz auftreten können, ist ein Quantenpunkt bestehend aus zwei Orbitalen, s. Bild 6a. Es treten Fluktuationen von Spin- und orbitalen Freiheitsgraden auf, die durch starke Ankopplung an die Reservoirs verstärkt werden können. Dies führt zu kollektiven Vielteilchenzuständen mit starken Korrelationen zwischen Orbitalen des Quantenpunktes und der Reservoirs. Für ein einziges einfach besetztes Orbital auf dem Quantenpunkt (d.h. nur Spinfluktuationen sind zugelassen) erhält man bereits eine erhöhte Zustandsdichte an der Fermikante, der sogenannte Kondo-Effekt. Der entsprechende erhöhte Leitwert konnte experimentell in Quantenpunkten nachgewiesen werden. Dies hat für grosses Aufsehen

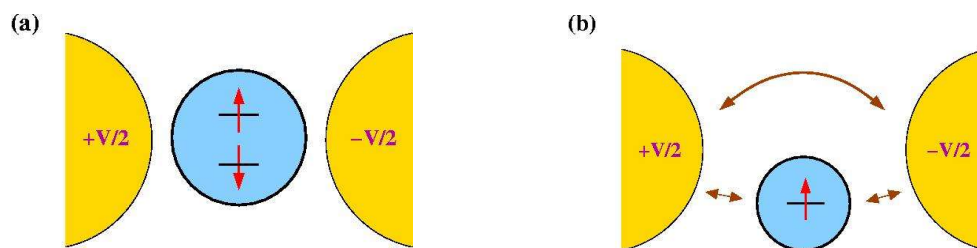


Bild 6: (a) Ein Quantenpunkt mit zwei Niveaus, der an zwei Zuleitungen angekoppelt ist. (b) Ein Quantenpunkt in einer Aharonov-Bohm-Geometrie, s.a. Bild 1a.

Referenzen: D. Boese, W. Hofstetter, and H. Schoeller, Phys. Rev. B 64, 125309 (2001); W. Hofstetter and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 88, 016803 (2002); W. Hofstetter, J. König, and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 87, 156803 (2001).

gesorgt, da es sehr schwierig ist, den Kondo-Effekt in Festkörpern zu identifizieren und kontrolliert zu steuern. In den am TPA theoretisch studierten Quantenpunkten mit zwei Niveaus wird der Kondo-Effekt mit Interferenzeffekten kombiniert, da die Elektronen über beide Orbitale vom Emitter zum Kollektor gelangen können. Je nach Phasenunterschied der beiden Wege verstärkt oder verringert dies den Kondo-Effekt. Es kann sogar zu Quantenphasenübergängen kommen, je nachdem ob der Grundzustand des Quantenpunktes ein Singlett- oder Triplet-Zustand ist. Bei der Fano-Geometrie in Bild 6b, wo die Elektronen die Möglichkeit haben, direkt von einem Reservoir zum anderen zu tunneln, führen Interferenzeffekte zu sehr ungewöhnlichen Linienformen. So

kann es z.B. bei destruktiver Interferenz passieren, dass der Leitwert ein Minimum hat, obwohl sich das Niveau des Quantenpunktes genau an der Fermikante befindet.

Molekulare Systeme: Mesoskopische und molekulare Systeme unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Längenskala, in beiden spielt die Quantenkohärenz die dominante Rolle für die physikalischen Eigenschaften. Molekulare Systeme haben den Vorteil, dass sie in einer grossen Vielzahl mit den modernen Methoden der supramolekularen Chemie synthetisiert werden können. Auch die Energieskalen sind grösser, so dass Quantenphänomene bei Raumtemperatur sichtbar sein sollten. Der Nachteil hingegen ist die schwierige Kontaktierung, da supramolekulare Systeme eine Grössenordnung von 1-10 nm haben. Trotzdem ist es mit den modernen Methoden der Nanolithographie und der STM-Technik gelungen, I-V-Kennlinien von einzelnen Molekülen aufzunehmen. Am TPA werden Transporteigenschaften von einzelnen organischen Molekülen, metallorganischen Komplexen, und molekularen Drähten untersucht (s. Bild 7+8). Wie bei Quantenpunkten tritt resonantes Tunneln durch molekulare Orbitale auf. Die Resonanzen sind aber stark verbreitert, da die π -Orbitale der organischen Moleküle stark mit den Zuleitungen überlappen. Das zukünftige Ziel ist daher der Einbau von molekularen Tunnelbarrieren zwischen Molekül und Elektrode. Wegen der kleinen Längenskala können die Positionen der Molekülorbitale nur schwer über Gatterspannungen gesteuert werden. Daher wird am TPA untersucht, ob geeignete Liganden die Funktion einer Gatterspannung

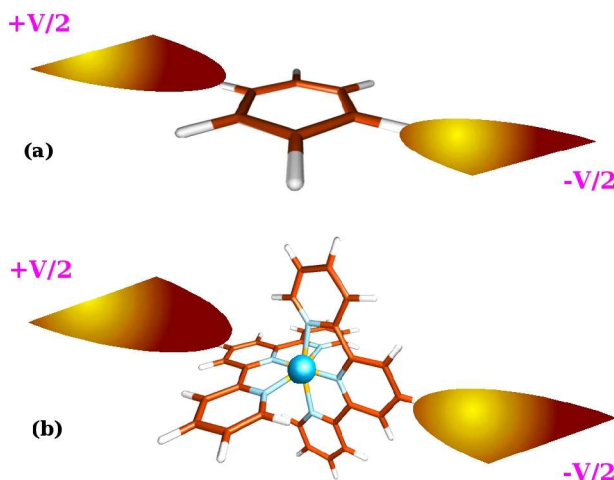


Bild 7: (a) Schematisches Bild eines einzelnen Benzol-Moleküls, welches über Tunnelbarrieren an zwei elektronische Reservoire angekoppelt ist. (b) Ein metallorganischer Komplex zwischen zwei Zuleitungen. Der Komplex besteht aus einem magnetischen Metallzentrum (z.B. Kobalt) und zwei zangenförmigen organischen Liganden, die über Thiol-Gruppen kovalent an Gold-Elektroden ankoppeln können.
Referenzen: M.H. Hettler, W. Wenzel, M.R. Wegewijs, and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 90, 076805 (2003); J. Park et al., Nature 417, 723 (2002).

übernehmen können. Liganden können zusätzlich technologisch interessante Effekte wie negativ differentiellen Leitwert erzeugen. Molekulare Systeme mit magnetischen Zentren (molekulare Magnete) zeigen wie Quantenpunkte den Kondo-Effekt. In komplexen Strukturen mit mehreren Metallzentren können,

abhängig vom Ladungszustand der organischen Liganden, Übergänge zwischen verschiedenen Spinzuständen auftreten. Dies kann zur Spinblockade führen, d.h.

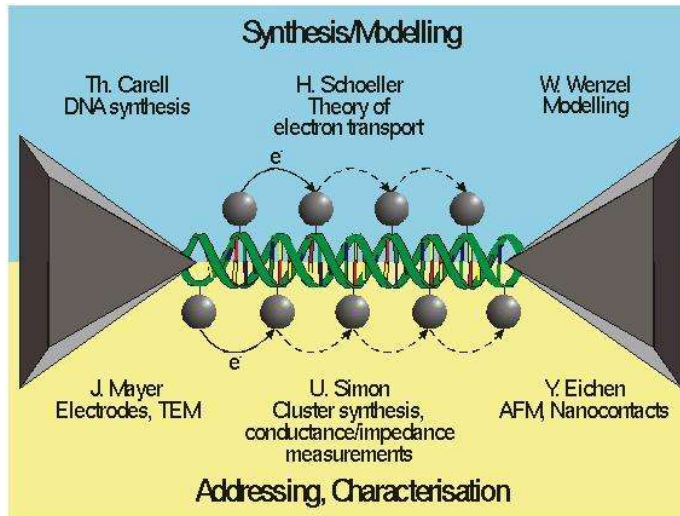


Bild 8: Ein DNA-Strang zwischen zwei Elektroden. Der molekulare Draht wird entweder durch metallische Nanoteilchen gebildet, die an der DNA mit Linkermolekülen gebunden werden, oder durch metallische Zentren, die in der DNA angelagert werden. Diese Systeme werden im Rahmen eines interdisziplinären VW-Projektes untersucht.

der Transportstrom wird spinabhängig unterdrückt. Auch Schwingungen und Rotationen spielen in molekularen Systemen eine wichtige Rolle. Vibrationen wurden z.B. in I-V-Charakteristiken von C_{60} -Clustern beobachtet. Kohärente Schwingungen werden am TPA im Zusammenhang mit dem Jahn-Teller Effekt untersucht.

Quantendrähte: Eindimensionale mesoskopische Systeme zeigen intrinsische kollektive Eigenschaften, die sehr ungewöhnlich sind. Setzt man z.B. eine einzige Störstelle in einen leitenden Quantendraht, so wird der Leitwert durch die Coulombwechselwirkung algebraisch als Funktion der Temperatur und Transportspannung unterdrückt, obwohl eine endliche quantenmechanische Tunnelwahrscheinlichkeit vorliegt. Quantendrähte verhalten sich nicht wie die aus der Festkörperphysik bekannten Fermiflüssigkeiten, sondern wie Luttinger-Flüssigkeiten. Die Zustandsdichte an Rändern und Störstellen ist algebraisch unterdrückt. Das sich daraus ergebene Skalenverhalten des Leitwertes als Funktion der Temperatur und der Transportspannung wird am TPA in endlichen Quantendrähten untersucht. Von Interesse sind hier z.B. konkurrierende Effekte von Tunnelbarrieren zu Reservoiren und Störstellen innerhalb der Quantendrähte, sowie das resonante Tunneln durch mehrere Störstellen. Auch die Kombination von elektronischen und magnetischen Quantendrähten, die über Austauschkopplungen wechselwirken, führen zu interessanten Vielteilcheneffekten. Elektronische und magnonische Freiheitsgrade bilden kollektive Eigenzustände, sogenannte Spinpolaronen, die sich als spezifische Resonanzen in der I-V-Charakteristik äußern. Eindimensionale Systeme spielen eine wichtige Rolle

für die Spinelektronik, wie z.B. die Realisierung des Datta-Das-Transistors (s. Bild 4). Für ferromagnetische Elektroden hängt der Leitwert stark davon ab wie die Spinrichtungen der beiden Elektroden relativ zueinander ausgerichtet sind, der sogenannte TMR-Effekt („tunneling magnetoresistance“). Wie der TMR-Effekt und andere Quantenkohärenzphänomene durch die ungewöhnlichen Eigenschaften von Vielteilcheneffekten in eindimensionalen Systemen beeinflusst wird, ist ein wichtiges Forschungsthema am TPA.

Zusammengefasst stellen mesoskopische Systeme faszinierende Quantensysteme dar. Zum einen eröffnen sie langfristig völlig neue Perspektiven für Quantenbauelemente auf der Basis von Spin- und Ladungseffekten, von denen insbesondere der „Quantencomputer“ eine revolutionäre Entwicklung darstellt. Zum anderen bieten sie eine Herausforderung für die Grundlagenforschung, da sowohl kohärente Quanteneffekte, starke Wechselwirkungen, und Nichtgleichgewichtseigenschaften berücksichtigt werden müssen. Dies hat die Entwicklung neuer Vielteilchen-Methoden initiiert, an denen auch das TPA beteiligt ist. Insbesondere werden Renormierungsgruppenverfahren für Nichtgleichgewichtsprobleme entwickelt, d.h. die Kombination von quantenfeldtheoretischen diagrammatischen Methoden mit kinetischen Theorien aus der statistischen Physik. Auch quantenchemische Rechnungen spielen für die Beschreibung molekularer Systeme eine wichtige Rolle.

Die mesoskopische Physik schafft weiterhin eine interdisziplinäre Brücke zwischen verschiedenen Naturwissenschaften der Physik, Chemie, und der Biologie. Auch die Informatik und Elektrotechnik erhält mit den neuen Entwicklungen der Quanteninformation eine neue Dimension. So kommt es, dass auch das TPA in verschiedenen nationalen und internationalen Schwerpunktsprogrammen und europäischen Netzwerken integriert ist, und über VW-Projekte und virtuelle Institute gemeinsame Forschungsprojekte mit Chemie und Elektrotechnik an der RWTH Aachen und dem FZ Jülich durchführt.